

УДК 539.43

П. Ясній, докт. техн. наук; Ю. Пиндус, канд. техн. наук;
В. Фостик; О. Галушак

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
Україна

ОЦІНКА МІНІМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ПІСЛЯ КОМБІНОВАНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ РОЗТЯГОМ-СТИСКОМ

Резюме. Досліджено вплив параметрів перевантаження розтягом та розтягом-стиском на швидкість росту втомної тріщини (РВТ) в алюмінієвому сплаві Д16Т. Здійснено моделювання затримки росту втомної тріщини після комплексних перевантажень розтягом та розтягом-стиском з допомогою методу скінченних елементів. Запропоновано використовувати коефіцієнт $C_{V\min}$, як параметр, що контролює мінімальну швидкість РВТ.

Ключові слова: перевантаження розтягом, перевантаження стиском, втомна тріщина.

P. Yasniy, Yu. Pyndus, V. Fostyk, O. Galuschak

DETERMINING OF THE MINIMAL OF FATIGUE CRACK GROWTH RATE AFTER COMBINED OVERLOAD-UNDERLOADS

The summary. It was investigated influence of the overload and underload parameters on the kinetics of the fatigue cracks growth in aluminum alloy D16T. Performed modeling of delay of fatigue crack growth after combined overloads underloads. It was proposed parameter $C_{V\min}$ which controls minimum speed of the FCG.

Key words: overload, underload, fatigue crack.

Вступ. Велика кількість інженерних споруд та механізмів працюють в умовах нерегулярного експлуатаційного навантаження. За таких обставин термін їх експлуатації залежить від послідовності циклів навантаження з різним амплітудним значенням (історії навантаження). Ігнорування ефекту взаємовпливу циклів навантаження при оцінюванні втомної довговічності на стадії конструювання може призвести до значних неточностей при визначенні експлуатаційного ресурсу, міжінспекційних інтервалів огляду та живучості конструкцій і вузлів.

Будь-яке нерегулярне експлуатаційне навантаження слід розглядати як взаємовплив циклів навантаження різної амплітуди. Встановлено [1–7], що перевантаження розтягом призводить до затримки РВТ (рис. 1).

Затримку РВТ зазвичай оцінюють кількістю циклів затримання N . Зростання коефіцієнта перевантаження розтягом Q_{ol} збільшує N і довжину зони затримки тріщини Δl_{OL} (рис. 1), зменшує мінімальну швидкість РВТ V_{\min} [3–13]. Коефіцієнт перевантаження розтягом визначається за формулою

$$Q_{ol} = \sigma_{ol} / \sigma_{\max}, \quad (1)$$

де σ_{ol} – максимальне напруження циклу перевантаження розтягом; σ_{\max} – максимальне напруження циклу за сталої амплітуди навантаження (рис. 2).

Зону затримки росту тріщини Δl_{OL} умовно розділяють на 3 ділянки залежно від швидкості на кожній з них: початкового прискорення 1; запізнення затримки (стрімкого

сповільнення РВТ) 2; стабілізації швидкості РВТ 3 (рис. 1). Для значення Q_{ol} (близько 2.5) початкове пришвидшення відсутнє [14, 15]. Ефект затримки РВТ після перевантаження зменшується, якщо коефіцієнт асиметрії циклу за сталої амплітуди R зростає [12, 13, 15]. На швидкість РВТ суттєво впливає розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK . Зокрема у роботах [14, 16] встановлено, що N зменшується зі зростанням ΔK при фіксованому значенні Q_{ol} . Відомо [9, 12, 14, 17, 18], що залежно від величини амплітуди навантаження і товщини зразка Δl_{OL} може бути більшою або меншою від довжини пластичної зони, сформованої перевантаженням розтягом у вістрі тріщини.

Багаторазові перевантаження розтягом призводять до зростання затримки швидкості РВТ у порівнянні з одноразовими перевантаженнями розтягом [14, 17].

У випадку одноразових або багаторазових перевантажень стиском [19, 20] спостерігається зростання швидкості РВТ. Встановлено, що перевантаження стиском, які прикладаються після перевантаження розтягом (комбіновані перевантаження), призводять до зменшення ефекту затримки РВТ. Якщо перевантаження стиском передуює перевантаженню розтягом, то зменшення ефекту затримки РВТ буде незначним у порівнянні з випадком перевантаження розтягом-стиском. Це вказує на необхідність врахування не тільки амплітуди перевантажень, а й послідовності їх прикладання [21, 22, 23].

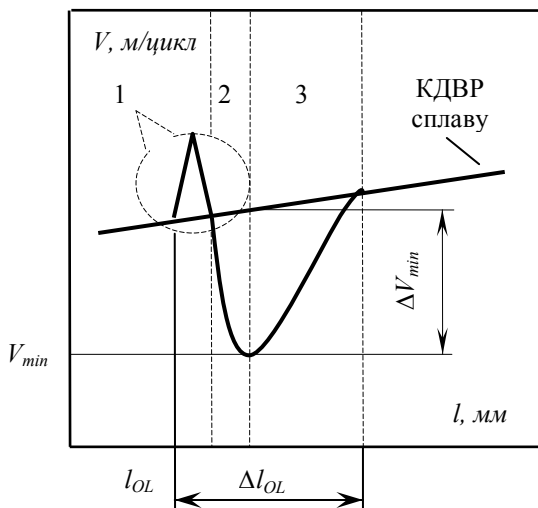


Рисунок 1. Швидкість РВТ після перевантажувань розтягом та розтягом-стиском

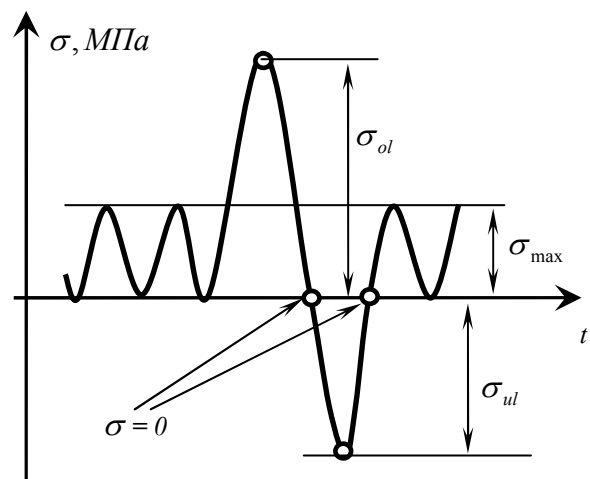


Рисунок 2. Схема перевантажувань розтягом та розтягом-стиском

Вплив перевантажень стиском на швидкість РВТ ігнорується в багатьох дослідженнях [24]. Проте його врахування дасть змогу уточнити розрахунок довговічності та живучості конструкцій, підвищити безпеку експлуатації і зменшити витрати на обслуговування машин і механізмів [25].

Методика досліджень. Для дослідження взаємовпливу перевантажень розтягом-стиском використовували плоскі прямокутні зразки з центральною тріщиною, виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т, згідно з ГОСТом 25.506-85. Зразки моделюють панель обшивки крила транспортного літака з отвором під заклепку [26]. Креслення зразка, механічні властивості та хімічний склад металу наведено в праці [27]. Для вимірювання швидкості РВТ на робочій ділянці зразка по обидва боки від

концентратора наносили розмітку у вигляді координатної сітки методом електрохімічного контурного травлення [28, 29].

Зразки випробовували на сервогідравлічній машині СТМ-100 з керуючим ПК типу IBM PC AT 286. Температура випробувань – 293 К, частота навантаження – 10 Гц, асиметрія циклу регулярного навантаження – $R=0$. Форма циклу навантаження – синусоїда.

Зародження тріщини та вимірювання її підростання здійснювали за методикою, приведеною в праці [27]. Спостереження за тріщиною здійснювали з використанням мікроскопа МБС-10.

Для попередження випучування плоских зразків при стиску використовували захисний кожух [30, 31] (рис. 3). Для зменшення тертя між зразком 3 та пластинами 1 використовували фторопластові прокладки 2. У центральній частині однієї з пластин передбачені вирізи 4 для спостереження за ростом тріщини.

До прикладання перевантажень швидкість РВТ стабілізували відповідно до кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) матеріалу за регулярного навантаження. Після перевантаження випробувальну машину програмно переводили в режим регулярного циклічного навантаження з постійним розмахом КІН та коефіцієнтом асиметрії R . Для забезпечення точності експерименту відпрацьовані машиною зусилля перевантажень записували на жорсткий диск. На етапі стрибкоподібного прискорення, подальшого різкого зниження швидкості тріщини і в період максимальної затримки тріщини після перевантажень, приріст тріщини вимірювали через (0.02-0.03 мм). Зі збільшенням (стабілізацією) швидкості РВТ дискретність замірів збільшували до 0.1 мм. Приріст тріщини вимірювали до досягнення нею розмірів розрахункової пластичної зони l_{PZ} циклу перевантаження розтягом за умов плоского напруженого стану (2)

$$l_{PZ} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\max OL}}{\sigma_{0.2}} \right)^2, \quad (2)$$

де $K_{\max OL}$ – КІН перевантаження; $\sigma_{0.2} = 318$ МПа – межа текучості сплаву Д16Т.

Перевантаження стиском характеризували коефіцієнтом перевантаження стиском Q_{ul}

$$Q_{ul} = \sigma_{ul} / \sigma_{ol}, \quad (3)$$

де σ_{ul} – напруження перевантаження стиском.

Швидкість РВТ після перевантажень розтягом-стиском досліджували в межах середньоамплітудної ділянки КДВР при $Q_{ol} = 1.4; 1.7; 2$ та $Q_{ul} = -0.6; -1; -1.4$.

Зразки перевантажували за схемою, наведеною на рисунку 2, і номінальних напружень брутто, вказаними у таблиці 1.

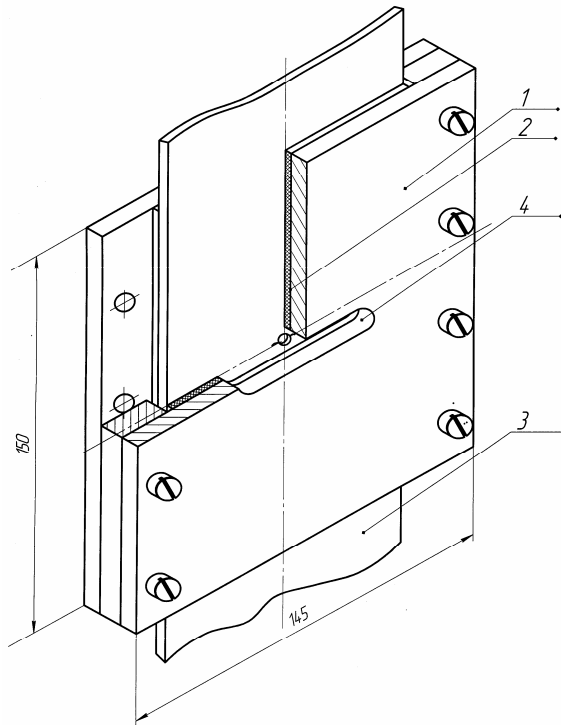


Рисунок 3. Захисний кожух для запобігання випучування зразка

Таблиця 1. Експериментальні напруження бруто у зразку за перевантажень розтягом - стиском

σ_{ol} , МПа	σ_{ul} , МПа	Q_{ul}
124	0	0
	-75	-0.6
	-125	-1.0
	-179	-1.4
145	0	0
	-85	-0.6
	-145	-1.0
	-203	-1.4
167	0	0
	-102	-0.6
	-169	-1.0
	-230	-1.4

У роботі досліджували напружено-деформований стан (НДС) у вістрі втомної тріщини після перевантаження розтягом та комплексного перевантаження розтягом-стиском із використанням методу скінченних елементів (МСЕ) за допомогою програмного комплексу ANSYS.

МСЕ моделювали чверть плоского зразка (з урахуванням умов симетрії) з центральною тріщиною в пружно-пластичній постановці з використанням істинної діаграми деформування сплаву Д16Т (рис. 4). Відтворювали реальні умови експерименту та характеристики сплаву за температури 293К. Навантаження прикладали до верхньої лінії (торця) моделі. Для моделювання контактних та стискувальних напружень у вістрі тріщини, закриття тріщини, що виникають внаслідок залишкових деформацій, на її берегах задавали контактні поверхні (використовували скінченні елементи CONTA172 і TARGE169). Таким чином відтворювали умови контакту берегів тріщини, що виникають у реальному зразку при її закритті, особливо після перевантажень розтягом. Розрахунки МСЕ проводили за умов плоского напруженого стану (plane stress), враховуючи ефект Баушінгера. Для побудови скінченно-елементної сітки використовували елемент PLANE182. Він має чотири вузли з двома ступенями вільності в кожному, може набувати чотирикутну або трикутну форми. Елемент має властивості пружності, пластичності, жорсткості, значних переміщень і деформацій.

Для вибору оптимальних розмірів елементів скінченно-елементної сітки у вістрі тріщини проводили її адаптацію [32]. Проаналізовано сітку з розмірами елементів від 1 мкм до 250 мкм. Встановлено, що оптимальний розмір елемента для моделювання РВТ

є 10 мкм. Подальше подрібнення сітки призводить до сповільнення розрахунків, але не покращує точності моделювання.

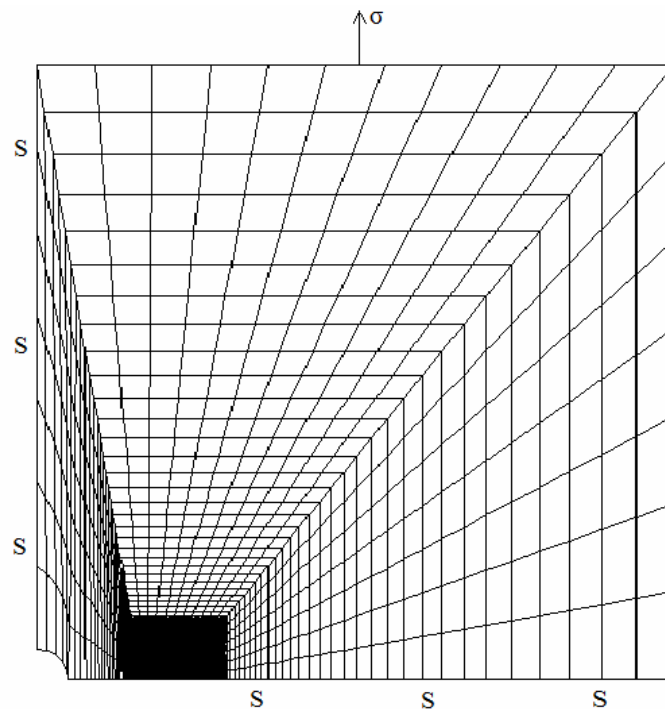


Рисунок 4. Скінченно-елементна модель плоского зразка з центральною тріщиною

Результати досліджень та їх обговорення. В усіх випадках експериментальних досліджень безпосередньо після перевантаження розтягом-стиском спостерігали стрімке прискорення швидкості РВТ (рис. 5) упродовж наступних 20-170 циклів регулярного навантаження. Потім швидкість РВТ знижувалася до деякого мінімального значення V_{\min} , після чого відбувалося поступове зростання швидкості до значення, яке відповідає КДВР.

У ході експериментів виявлено вплив параметрів перевантаження (Q_{ol} , Q_{ul}) на кінетику РВТ, зокрема на V_{\min} . Зміна V_{\min} із врахуванням параметрів перевантаження розтягом-стиском (Q_{ol} , Q_{ul}) є важливою характеристикою оцінки впливу перевантажень на кінетику РВТ.

На рисунку 5 зображено криві швидкості РВТ після перевантажувань розтягом та розтягом-стиском при сталому $Q_{ol} = 1.7$ і різних Q_{ul} (0 ÷ -1.4).

Встановлено, що розмах

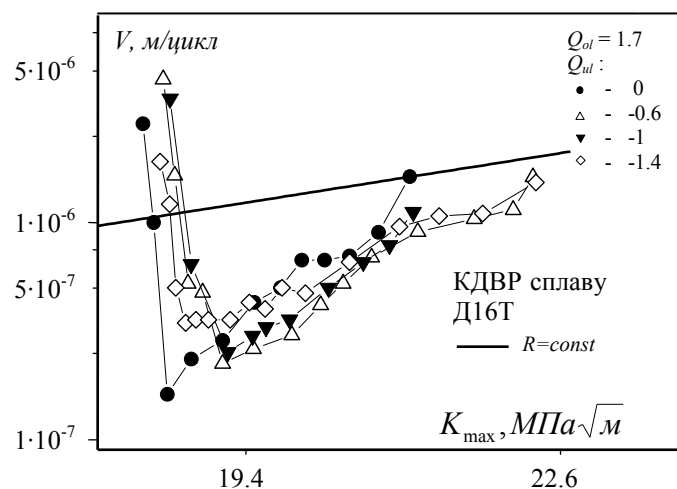


Рисунок 5. Кінетика РВТ після перевантаження розтягом-стиском

спаду швидкості РВТ ΔV_{\min} зменшується зі зміною Q_{ul} від -0.6 до -1.4. ΔV_{\min} є різницею швидкості РВТ за постійного амплітудного навантаження (безпосередньо до перевантаження) і мінімальною швидкістю РВТ після перевантаження V_{\min} (див. рис. 1). У випадку перевантаження зразка розтягом при $Q_{ol} = 1.7$ та $Q_{ul} = 0$, $V_{\min} = 1.6 \cdot 10^{-7}$ м/цикл, а $\Delta V_{\min} = 9.58 \cdot 10^{-7}$ м/цикл. За таких умов спостерігається максимальне зменшення швидкості РВТ ΔV_{\min} . Після комбінованого перевантаження зразка розтягом-стиском ($Q_{ol} = 1.7$, $Q_{ul} = -0.6$) зменшується ефект затримки швидкості РВТ ($V_{\min} = 2.24 \cdot 10^{-7}$ м/цикл, $\Delta V_{\min} = 9.56 \cdot 10^{-7}$ м/цикл). Різниця між значеннями ΔV_{\min} у цих двох випадках становить $1.93 \cdot 10^{-9}$ м/цикл. Зі збільшенням напруження перевантаження стиском, яке супроводжується зменшенням Q_{ul} від -0.6 до -1.4 ΔV_{\min} , зменшується від $9.56 \cdot 10^{-7}$ до $7.74 \cdot 10^{-7}$ м/цикл (табл. 2).

Таблиця 2. Залежність V_{\min} від Q_{ul}

Q_{ul}	0	-0.6	-1	-1.4
V_{\min} , м/цикл	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$2.24 \cdot 10^{-7}$	$2.53 \cdot 10^{-7}$	$3.46 \cdot 10^{-7}$
ΔV_{\min} , м/цикл	$9.58 \cdot 10^{-7}$	$9.56 \cdot 10^{-7}$	$9.37 \cdot 10^{-7}$	$7.74 \cdot 10^{-7}$

Для пояснення поведінки тріщини після перевантажень розтягом та розтягом-стиском проведено моделювання НДС у вістрі тріщини МСЕ за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Навантаження моделювали згідно зі схемою, наведеною на рис. 2. Спочатку зразок навантажували циклічним навантаженням сталої амплітуди, яке створювало в ньому напруження бруто $\sigma = 83 \text{ МПа}$. За цих умов, для відтворення реального НДС у вістрі тріщини, її пророщували на довжину 1 мм із розрахунковою швидкістю РТВ $1 \cdot 10^{-6}$ м/цикл, що відповідає КДВР при $K_{\max} = 15.6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, після чого зразок перевантажували розтягом або комбінованим розтягом-стиском.

Перевантажування розтягом здійснювали до досягнення напруження бруто у зразку $\sigma_{ol} = 168.7 \text{ МПа}$. Напруження в зразку вимірювали спереду вістря тріщини, у напрямку, перпендикулярному дії нормальних напружень. Отриманий розподіл нормальних напружень σ_y спереду вістря тріщини до перевантаження в момент перевантаження та після перевантаження розтягом наведено на рис. 6.

Згідно з отриманими результатами розрахунку НДС спереду вістря тріщини, при розвантаженні зразка після перевантаження розтягом, спостерігається значне зростання залишкових стискувальних напружень (рис. 6г) по амплітуді та по довжині їх дії спереду тріщини у порівнянні з залишковими напруженнями до перевантаження (рис. 6б).

Крім того, при навантаженні зразка до $\sigma = 83 \text{ МПа}$, що відповідає навантаженню постійної амплітуди, крива розподілу нормальних напружень у вістрі тріщини після перевантаження розтягом (рис. 6д) суттєво зміщується вниз у порівнянні з відповідною кривою до перевантаження розтягом (рис. 6а). Такі закономірності НДС у вістрі тріщини пояснюють ефект затримки швидкості РВТ після перевантаження розтягом. Це можна розглядати як вплив залишкових деформацій та залишкових стискувальних напружень, сформованих дією перевантаження розтягом.

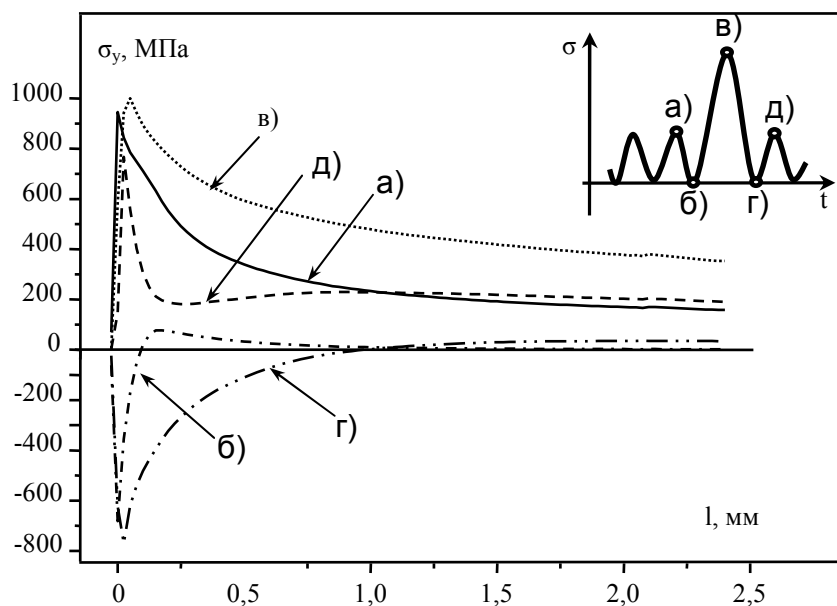


Рисунок 6. Розподіл нормальних напружень до та після перевантаження розтягом:
 а) максимум циклу регулярного навантаження до перевантаження розтягом; б) розвантаження при регулярному навантаженні до перевантаження розтягом; в) перевантаження розтягом; г) розвантаження при регулярному навантаженні після перевантаження розтягом; д) максимум циклу регулярного навантаження після перевантаження розтягом

МСЕ моделювали комбіноване перевантаження розтягом до напруження $\sigma_{ol} = 168,7 \text{ МПа}$ з наступним перевантаженням стиском до $\sigma_{ul} = -168,7 \text{ МПа}$. Розподіл нормальних напружень σ_y спереду вістря тріщини після перевантаження розтягом-стиском зображено на рис. 7.

Очевидно, що перевантаження стиском, яке йде після перевантаження розтягом, призводить до значного зменшення амплітуди залишкових стискувальних напружень (рис. 7е) у порівнянні з відповідним розподілом залишкових стискувальних напружень після перевантаження розтягом (рис. 7г). Крім того, вказані криві свідчать про те, що довжина зони дії залишкових стискувальних напружень не зменшилася після перевантаження стиском і, відповідно, можна зробити припущення, що перевантаження стиском не зменшують довжину зони затримки РВТ.

Амплітудні значення розподілу нормальних напружень, що виникають у вістрі тріщини після перевантаження розтягом-стиском (рис. 7е) є меншими, ніж до перевантаження (рис. 7а), але не настільки суттєво, як після перевантаження лише розтягом (рис. 6д). Це зумовлює зростання мінімальної швидкості РВТ після перевантаження розтягом-стиском порівняно з перевантаженням розтягом.

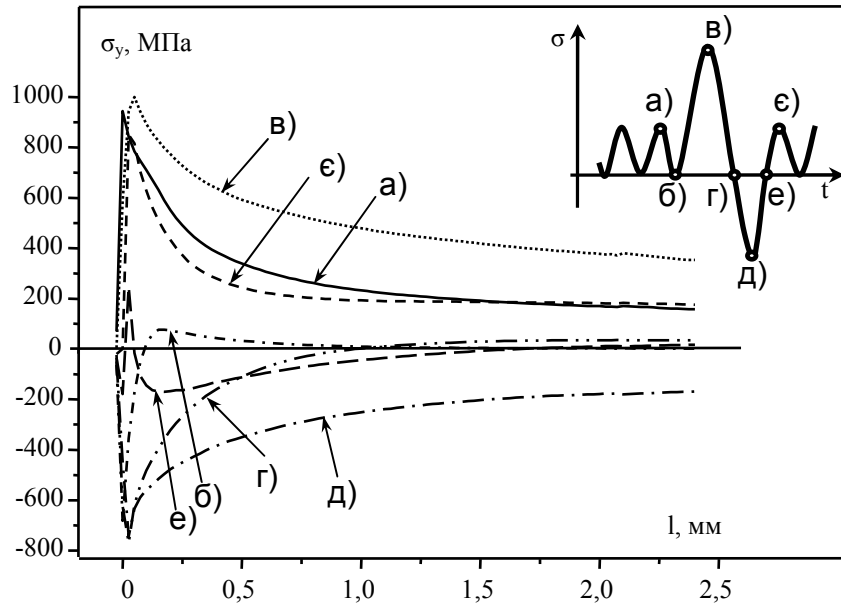


Рисунок 7. Розподіл нормальних напружень до та після перевантаження розтягом-стиском:
 а) максимум циклу регулярного навантаження до перевантаження розтягом; б) розвантаження при регулярному навантаженні до перевантаження розтягом; в) перевантаження розтягом; г) розвантаження при регулярному навантаженні після перевантаження розтягом; д) перевантаження стиском; е) розвантаження при регулярному навантаженні після перевантаження стиском; є) максимум циклу регулярного навантаження після перевантаження стиском

На рис. 8 наведено експериментальні результати зміни V_{\min} у сплаві Д16Т при $R=0$ за різних параметрів перевантаження розтягом-стиском (Q_{ol}, Q_{ul}). Товстою суцільною кривою наведено апроксимацію експериментальних даних за рівнянням Періса [27]

$$V = C(\Delta K)^n, \quad (4)$$

де $C = 5.2061 \cdot 10^{-11}$ та $n = 3.4$.

Розглянемо вплив Q_{ul} на зміну V_{\min} для випадку $Q_{ol} = 1.4$ (рис. 8а). Після одноразового перевантаження розтягом із ($Q_{ol} = 1.4, Q_{ul} = 0$) на різних ділянках КДВР швидкість РВТ зменшувалась до V_{\min} . Причому ці три точки вкладаються в криву, паралельну КДВР у логарифмічних координатах. Аналогічна закономірність була отримана в праці [33], що дало змогу описати V_{\min} при $Q_{ol} = \text{const}$ степеневою функцією

$$V_{\min} = C_{V_{\min}} \cdot K_{\max}^n, \quad (5)$$

де $C_{V_{\min}} = \text{const}$ – коефіцієнт, який характеризує мінімальну швидкість РВТ при $Q_{ol} = \text{const}$ і $Q_{ul} = \text{const}$.

Отримана крива паралельна КДВР, отриманій при сталому амплітудному навантаженні. При цьому показник степеня $n = 3.4$ залишали сталим, а коефіцієнт $C_{V_{\min}}$ змінювали при зміні Q_{ol} і Q_{ul} .

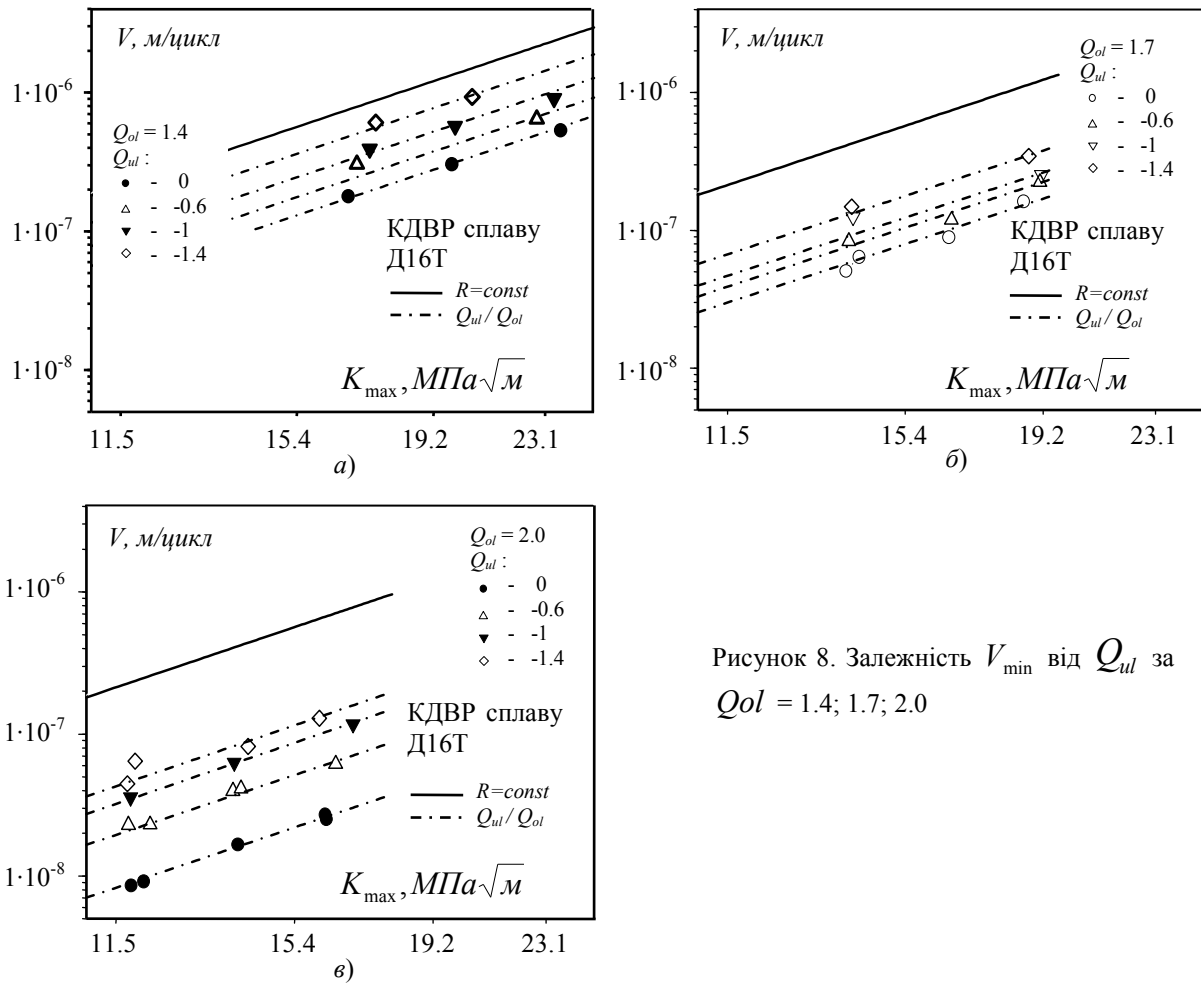


Рисунок 8. Залежність V_{\min} від Q_{ul} за $Q_{ol} = 1.4; 1.7; 2.0$

Виявлено аналогічну поведінку V_{\min} за сталих значень Q_{ol} та Q_{ul} (рис. 8). Це дає змогу використати коефіцієнт $C_{V_{\min}}$ як параметр, що характеризує V_{\min} залежно від Q_{ol} та Q_{ul} .

На рис. 9 зображено криві залежності зміни $C_{V_{\min}}$ від Q_{ul} за сталих значень $Q_{ol} = 1.4, 1.7, 2$ та зміни Q_{ul} від 0 до -1.4. Розглянемо вплив Q_{ul} на зміну $C_{V_{\min}}$ для випадків $Q_{ol} = 2$ та $Q_{ul} = (0 \div -1.4)$ (крива 3, рис. 9). Після перевантаження розтягом ($Q_{ol} = 2$ $Q_{ul} = 0$) відбувається найбільша затримка РВТ, при цьому $C_{V_{\min}} = 2.0298 \cdot 10^{-12}$, тобто максимальне зменшення швидкості РВТ відбувається за відсутності перевантаження стиском. Зменшення Q_{ul} від 0 до -1.4 при $Q_{ol} = 2$ збільшує $C_{V_{\min}}$ до $1.047 \cdot 10^{-11}$ (рис. 9). Така закономірність зберігається при зміні Q_{ul} за сталих $Q_{ol} = 1.7; 1.4$ (рис. 9 – 1, 2). При зменшенні Q_{ol} криві $Q_{ul} \sim C_{V_{\min}}$ зміщуються вправо, що свідчить про інтенсивніше зростання V_{\min} .

Отже, $C_{V_{\min}}$ – це параметр, який характеризує мінімальну швидкість РВТ залежно від Q_{ol} та Q_{ul} і дає можливість його використання для оцінювання мінімальної швидкості РВТ після перевантаження розтягом, розтягом-стиском та за нерегулярного навантаження.

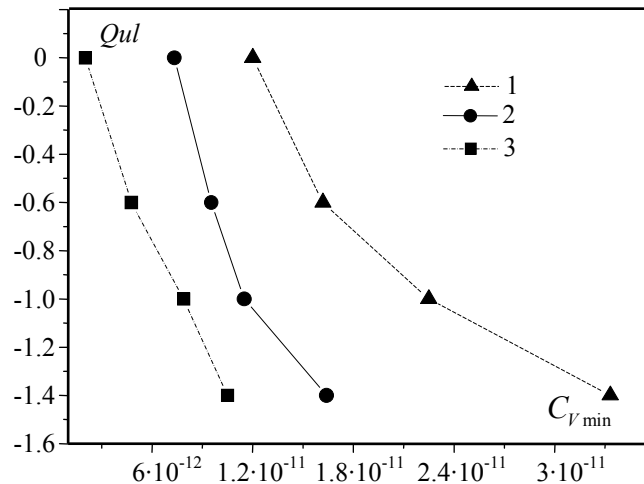


Рисунок 9. Залежність Q_{ul} від C_{Vmin} при параметрах навантаження: 1 – $Q_{ol} = 1.4$; 2 – $Q_{ol} = 1.7$; 3 – $Q_{ol} = 2$

Таблиця 3. Зведені дані залежності C_{Vmin} від зміни параметрів навантаження (Q_{ol}, Q_{ul})

$C (R = const)$	Q_{ol}	C_{Vmin} ($Q_{ul}=0$)	C_{Vmin} ($Q_{ul}=-0.6$)	C_{Vmin} ($Q_{ul}=-1$)	C_{Vmin} ($Q_{ul}=-1.4$)	n
$5.2061 \cdot 10^{-11}$	1.4	$1.20 \cdot 10^{-11}$	$1.62 \cdot 10^{-11}$	$2.25 \cdot 10^{-11}$	$3.33 \cdot 10^{-11}$	3.4
	1.7	$7.33 \cdot 10^{-11}$	$9.53 \cdot 10^{-11}$	$1.15 \cdot 10^{-11}$	$1.64 \cdot 10^{-11}$	
	2.0	$2.03 \cdot 10^{-12}$	$4.8 \cdot 10^{-12}$	$7.87 \cdot 10^{-12}$	$1.1 \cdot 10^{-11}$	

Висновки

- Виявлено закономірності впливу параметрів перевантаження розтягом Q_{ol} та стиском Q_{ul} на швидкість РВТ. Встановлено, що перевантаження стиском після перевантаження розтягом збільшує швидкість РВТ і зменшує ефект затримки РВТ після перевантаження розтягом.
- Досліджено розподіл нормальних напружень в околі вістря тріщини до та після перевантаження з допомогою МСЕ з використанням програмного комплексу ANSYS.
- Запропоновано використовувати коефіцієнт C_{Vmin} як параметр, який описує мінімальну швидкість РВТ V_{min} залежно від параметрів перевантаження Q_{ol} та Q_{ul} .
- Досліджено вплив параметрів перевантажень Q_{ol} та Q_{ul} на мінімальну швидкість РВТ V_{min} . Виявлено, що зі зменшенням Q_{ul} від 0 до -1.4 при сталих значеннях $Q_{ol} = 1.4, 1.7, 2$ відбувається зростання C_{Vmin} , причому за менших значень Q_{ol} V_{min} інтенсивніше зростає.

Література

- Ясній, П.В. Вплив одноразового перевантажування на ріст втомної тріщини в сплаві Д16Т [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 57–60.

2. Paris, P.C. Twenty years of reflection on questions involving fatigue crack growth, Part II: Some observation on fatigue and fatigue thresholds / P.C. Paris, L. Henman // *Proc. 1st Int. Conf. on Fatigue Thresholds*, J. Backlund, A.F. Blom, C.J. Beevers. – Warley: EMAS, Ltd, 1982. – № 1. – P. 11–32.
3. McEvily, A.J. The nature of the two opening levels following an overload in fatigue crack growth / A.J. McEvily, Z. Yang // *Metallurgical Transactions*. – 1990. – № 21A. – P. 2717–2727.
4. Bao, H. The effect of overload on the rate of crack propagation under plane stress conditions / H. Bao, A.J. McEvily // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 1995. – № 26A. – P. 1725–1733.
5. Ward-Close, C.M. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading: an experimental and numerical study / C.M. Ward-Close, A.F. Blom, R.O. Ritchie // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1989. – Vol. 32. – P. 613–638.
6. Topper, T.H. Derivation of crack closure and effective fatigue crack growth data from smooth specimen fatigue test / T.H. Topper, T.S. Lam // *Report of Fatigue Branch of the Society of Materials Science*. – 2003. – Vol. 266. – P. 1–12.
7. Makabe, C. Effects of negative stress ratios on crack propagation behavior after an overload / C. Makabe, A.J. McEvily, A. Purnowidodo, A. Yamauchi // *Int. J. Modern Physics. B*. – 2003. – Vol. 17. – P. 1580–1586.
8. Iwasaki, T. Fatigue crack growth under random loading / Iwasaki T., Katoh A., Kawahara M. // *Naval Architecture and Ocean Engng*. – 1982. – Vol. 20. – P. 194–216.
9. Robin, C. Influence of the overload on the fatigue crack growth in steels / Robin C., Louah M., Pluvinage G. // *Fatigue Engng Mater. Struct.* – 1983. – Vol. 6. – P. 1–13.
10. Chen, G.L. Delay effects in AISI 1035 steel / Chen G.L., Roberts R. // *Engng Fracture Mech.* – 1985. – Vol. 22. – P. 201–212.
11. Blom, A.F. Overload retardation during fatigue crack propagation in steels of different strengths / A.F. Blom // *Scand. J. Metall.* – 1989. – Vol. 18. – P. 197–202.
12. Shin, C.S. On the mechanisms and behaviour of overload retardation in AISI 304 stainless steel / Shin C.S., Hsu S.H. // *Int. J. Fatigue*. – 1993. – Vol. 15. – P. 181–192.
13. Tsukuda, H. Transient fatigue crack growth behaviour following single overloads at high stress ratios / Tsukuda H., Ogiyama H., Shiraishi T. // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1996. – Vol. 19. – P. 879–891.
14. Ward-Close, C.M. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading: An experimental and numerical study / Ward-Close C.M., Blom A.F., Ritchie R.O. // *Engng Fracture Mech.* – 1989. – Vol. 32. – P. 613–638.
15. Damri, D. Transient retardations in fatigue crack growth following a single peak overload / Damri D., Knott J.F. // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1991. – Vol. 14. – P. 709–719.
16. Vecchio, R.S. An overload-induced fatigue crack propagation behaviour in aluminium and steel alloy / Vecchio R.S., Hertzberg R.W., Jacard R. // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1984. – Vol. 7. – P. 181–194.
17. Shuter, D.M. Some aspects of fatigue crack growth retardation behaviour following tensile overloads in a structural steel / Shuter D.M., Geary W. // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1996. – Vol. 19. – P. 185–199.
18. Fleck, N.A. Influence of stress state on crack growth retardation / Fleck N.A. // *Basic Questions in Fatigue*. – ASTM STP 924, 1988. – Vol. 1. – P. 157–183.
19. Dabayeh, A.A. Fatigue of cast aluminium alloys under constant and variable amplitude loading / Dabayeh A.A., Xu R.X., Du P.B., Topper T.H. // *Int J Fatigue*. – 1996. – Vol. 18. – P. 95–104.
20. Fleck, N.A. Fatigue crack growth due to periodic underloads and Overloads / Fleck N.A. // *Acta Metall.* – 1985. – Vol. 33. – P. 1339–1354.
21. Chang, J.B. Fatigue crack growth behaviour and life predictions for 2219-T851 aluminium subjected to variable-amplitude loadings / Chang J.B., Engle R.M., Stolpestad J. // *Fracture Mechanics Thirteenth Conference: ASTM STP No743*. – 1981. – P. 3–27.
22. Zhang, S. Crack propagation studies on Al 7475 on the basis of constant amplitude and selective variable amplitude loading histories / Zhang S., Marissen K., Schulte K., Trautmann K.H., Nowack H., Schijve J. // *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* – 1987. – Vol. 10. – P. 315–332.
23. Stephens R.I. Fatigue crack growth with negative stress ratio following single overloads in 2024-T3 and 7075-T6 aluminium alloys / Stephens R.I., Chen D.K., Horn B.W. // *Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads: ASTM STP No595*. – 1976. – P. 172–183.
24. Macha, D.E. Effects of Gas turbine engines load spectrum variables on crack propagation / Macha D.E., Grandt A.F., Wicks B.J. // *Effect of load spectrum variables on fatigue crack initiation and propagation: ASTM STP No714*. – 1980. – P. 108–127.
25. Carlson, R.L. Effects of compressive load excursions on fatigue crack growth / Carlson R.L., Kardomateas G.A. // *Int J Fat.* – 1994. – Vol. 16. – P. 141–146.

26. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении: РД 50-345-82: – Изд-во стандартов, 1983. – 95с.
27. Ясній, П. Вплив асиметрії циклу навантаження на характеристики циклічної тріщиностійкості алюмінієвого сплаву Д16Т [Текст] / П. Ясній, Ю. Пиндус, В.Фостик // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – Т.12. – Р.7–12.
28. Пат. 25367 Україна, МПК8G01B11/16. Спосіб нанесення на поверхню гладких зразків ділильних сіток [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус, В.Б. Фостик; заявник Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. – u200702400; заявл. 05.03.2007; опубл. 10.08.2007, Бюл. №12.
29. Пат. 33067 Україна, МПК8 G01N 1/00. Спосіб розмічування поверхонь металевих плоских зразків [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус, В.Б. Фостик; заявник Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. – u200801368; заявл. 04.06.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.
30. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ пособие. Ч.2 [Текст] / В.В. Панасюк та ін. – К.: Наукова думка, 1988. – 620с.
31. Дышель, М.Ш. Разрушение и устойчивость тонких тел с трещинами [Текст] / М.Ш. Дышель, Г.Г. Кулиев, О.Б. Милованова. – К.: Наукова думка, 1981. – 184с.
32. Пиндус, Ю. Адаптація розмірів сітки скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану у вістрі тріщини в пружно-пластичній постановці за умов плоскої деформації [Текст] / Ю.І. Пиндус, О.М. Галушак // Збірник тез доповідей механіко-технологічного факультету Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – С. 12–13.
33. Ясній, П. Вплив перевантажування на поширення втомних тріщин за різних асиметрій циклу навантаження в сплаві Д16чТ [Текст] / П.В. Ясній, Ю.І. Пиндус, О. Семенець // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ, 2001. – Т.6 – №4. – С.5–12.